



## fMRIによる歩行模擬動作時の脳機能解析を可能とする下肢動作提示システム

著者	池田 貴公
内容記述	この博士論文は内容の要約のみの公開（または一部非公開）になっています
発行年	2015
学位授与大学	筑波大学 (University of Tsukuba)
学位授与年度	2014
報告番号	12102甲第7291号
URL	<a href="http://hdl.handle.net/2241/00133484">http://hdl.handle.net/2241/00133484</a>

## 要約

fMRIによる歩行模擬動作時の脳機能解析を  
可能とする下肢動作提示システム

池田 貴公

システム情報工学研究科

筑波大学

2015年3月

脳機能の探求は科学の歴史以来の人の興味である。大脳皮質はその部位により異なる機能を担う（大脳皮質機能局在）。大脳皮質機能局在の検索方法は大きく（1）病態との関連による臨床的手法、および（2）近代的検索方法に分けられる。（1）は更に（1-a）脳内病変と症状との関連、および（1-b）てんかん発作の症候分析に分けられる。一方、（2）は（2-a）大脳皮質の電気・磁気刺激法（外的脳刺激方法）、および（2-b）脳機能賦活検索法に分けられる。（1-a）および（1-b）は病変による機能の損失や低下により大脳機能局在を検索しているため、病的状態を切り離すことは不可能である。また、（2-a）は脳外科手術が必要な患者に行われることが常であり、更に外的脳刺激によりてんかん発作を模擬するものであるため、病的状態を切り離すことは不可能である。健常脳において大脳機能局在を検索するためには（2-b）により特に非侵襲的に脳活動を計測する必要がある。更に運動している際の脳の各領域間の連携による機能局在を検索するためには（2-b）により検索する必要がある。また、運動時に働く脳領域は大脳皮質だけではなく深部領域を含むため、脳全域の活動を計測する必要がある。非侵襲的に脳全域を計測するためには機能的核磁気共鳴画像（functional Magnetic Resonance Imaging: fMRI）が最適である。

本研究では特に下肢動作時の脳機能に焦点を当てる。fMRIを用いた下肢動作と脳活動の関係を明らかにする研究として、足関節動作時の脳活動計測が広く行われている。下肢全体の動作を対象とした脳活動の研究として、自転車のペダルを模した機器を用いたペダル漕ぎ動作時の脳活動計測やステップ動作を対象とした脳活動計測が行われている。しかし、これらの研究では動作は片脚1自由度であり、歩行動作を初めとする下肢の様々な動作を許容しておらず、歩行動作時の脳活動を計測することが出来ない。

そこで本論文では歩行動作時の脳機能解析を可能とするために、以下の目的を設定する。

- fMRI撮像環境下で装着者に歩行模擬動作および動作に伴う足底反力を提示可能な下肢動作提示システム（Lower-extremity motion simulator: LoMS）を開発する。
- MRI 適合性試験により、LoMSがMRI適合性を有しfMRI撮像環境下で使用可能であることを示す。
- 歩行模擬動作提示性能評価により、LoMSが歩行模擬動作を提示することで装着者へ歩行動作感覚を与えることが可能であることを筋活動の観点から示す。
- 歩行模擬動作時の脳活動計測により、LoMSによる動作提示時に脳活動計測が可能であることを確認するとともに、歩行模擬動作により歩行に関連する脳領域が賦活することを示す。
- LoMSを用いた下肢動作時の脳活動計測の例として半側負荷歩行模擬動作時の脳活動計測およびステップ動作時の足底反力の有無による脳活動変化計測を行う。

研究開発したLoMSはfMRIにより人の脳活動を計測する際に人の下肢に歩行模擬動作を提示し人が動作することにより歩行動作感覚を与える。LoMSの動作環境はMRI検査室内でfMRI撮像中であり、3Tの静磁場と10MHz以上の電磁波（RFパルス）が伴うため、以下のMRI適合性を有する必要がある。

条件1 LoMSがMRI装置に吸引されるなど安全上問題を起こさない（MRI安全性）。

条件2 LoMSの存在および動作がMRIの画質に影響を与えない。

条件3 MRIの磁場および撮像動作によりLoMSの機能が影響を受けない。

MRI適合性を満たすために、LoMSのシステムのうちMRI検査室内に持ち込む必要のある部分は非磁性体で構成する。また、LoMSのアクチュエータは非磁性体で構成される必要があるため、Mckibben型空気圧式人工筋肉を使用する。各関節に屈筋および伸筋として2本の人工筋肉を配し、関節トルクを提示する。更に、LoMSの自重を免荷するために股関節および膝関節に線形引張りバネを有する。また、歩行時の足底への反力を模擬するためにLoMSの足部には空気圧駆動の足

底反力提示装置を配する。足底反力提示装置により、足底へ反力中心の移動を提示する。LoMSは関節角度を計測するために各関節にロータリポテンショメータを有する。なお、MRIのRFパルスによるノイズを除去するためにカットオフ周波数10.6Hzのアナログローパスフィルタを介して関節角度を計測する。なお、検査室内に持ち込む必要のある部分は部品毎に0.6TのU字ネオジム磁石に吸引されないことを確認した上でMRI本体に吸引されないことを確認し、MRI適合性の条件1であるMRI安全性を満たすことを確認した。MRI適合性の条件2、3を確認するためにMRI適合性試験を行う。

MRI適合性試験では、条件1を確認するために磁化率アーチファクト試験、条件2を確認するためにRFパルスノイズ試験を行った。2つの試験ではそれぞれ、

- LoMSの存在および動作がMRIの撮像画質を低下させないこと、また
  - LoMSの関節角度計測がMRIの撮像動作によるノイズを受けないこと
- を確認する。

磁化率アーチファクト試験により、LoMSとMRIの撮像領域であるヘッドコイルまでの距離が実用時の最短距離である400mm以上離れている場合にLoMSの存在および動作がMRIの撮像画質を低下させないことを確認した。また、RFパルスノイズ試験では簡易なアナログローパスフィルタを用いることによりMRI撮像中に発生するRFパルスによりノイズを受けずにLoMSの関節角度を計測可能であることを確認した。以上よりLoMSがMRI適合性を有することを確認した。

歩行模擬動作提示性能評価ではLoMSが歩行模擬動作を提示し人が動作することにより人に与える動作感覚を、トレッドミル歩行時と歩行模擬動作時の生体電位（BEP）遷移、および足関節底屈筋の抑制を比較し評価する。

BEP遷移による評価では腸腰筋（IP）、大腿四頭筋（QF）、大腿二頭筋（BF）、前脛骨筋（TA）およびヒラメ筋（SOL）でBEPを計測し、各筋でトレッドミル歩行時と歩行模擬動作時のBEPを比較し相関を評価した結果、TAおよびSOLで高い相関が、IPおよびQFで中程度の相関があり、一方でBFでは相関が見られなかった。通常の立位での歩行では人は動作を意識せずに行うことが可能であるが、仰臥位で歩行模擬動作を行う場合、動作を意識して行うためBFのBEPに相関しなかったと考えられる。ただし、足関節の拮抗筋であるTAおよびSOLでは特に相関が高く、歩行模擬動作により歩行時の足関節の動作感覚を高く再現可能であることを確認した。

足関節底屈筋の抑制による評価では、膝窩部より脛骨神経を電気刺激することでヒラメ筋で生じるH波を利用してヒラメ筋の抑制を計測し、トレッドミル歩行時と歩行模擬動作時のヒラメ筋の抑制を比較し評価する。結果、歩行模擬動作時にヒラメ筋はトレッドミル歩行時と同等に抑制されることを確認した。筋の抑制は小脳-脳幹-脊髄レベルで自動的に制御されるため、LoMSが歩行模擬動作を提示することにより、歩行時に生じる小脳-脳幹-脊髄レベルの自動的制御を誘発可能であることを確認した。

歩行模擬動作時の脳活動計測では、仰臥位の人へLoMSにより歩行模擬動作を提示する際の脳活動をfMRIにより計測し、歩行に関連する脳領域が賦活することを確認する。

歩行模擬動作を行うことにより、補足運動野（SMA）、一次運動野（M1）、一次体性感覚野（S1）および小脳虫部が賦活することを確認した。SMA、M1およびS1の賦活は正中線付近であり、これらの領域は歩行動作に関連する。また、小脳虫部はバランスを保つ際に賦活し、歩行時にも賦活する。したがって、人へ歩行模擬動作を提示し人が動作することにより歩行に関連する脳領域が賦活することを確認した。

半側負荷歩行模擬動作時の脳活動計測では、動作イメージと動作感覚の乖離により生じる脳活動変化を計測する。半側負荷歩行模擬動作では人の右脚にのみ歩行模擬動作を提示し、左脚には提示しないことにより、左脚のみに自重による負荷を与える。被験者には左右の歩幅を同等にし通常の歩行動作軌道を描く様に指示を与える。負荷に寄り、イメージと動作感覚に乖離を生じさせる。半側負荷歩行模擬動作時と通常の歩行模擬動作時の脳活動を比較し負荷による脳活動への影響を明らかにする。

半側負荷歩行模擬動作により、通常の動作フィードバックループが有意に高く賦活した。更に下頭頂葉の一部が有意に賦活した。この領域はブロードマンの脳地図によると動作の抑制や観測、運動学習などにも関連するとされている。半側負荷歩行模擬動作時にこの領域は動作の調整に補助的な役割を担うと考えられる。

ステップ動作時の足底反力の有無による脳活動変化計測では、ステップ動作を提示する際に足底へ反力を提示する場合と提示しない場合の脳活動を計測し、比較することにより、足底反力による脳活動への影響を明らかにする。

足底反力を提示しない場合、提示する場合と比較してM1での賦活が外側へ広がることを確認した。これは、動作時の感覚フィードバックである足底反力を提示しないことにより、動作状態を足底反力により知覚できなくなるため、下肢全体の感覚から動作状態を推定する必要がある、M1の賦活領域が広がったと考えられる。また、足底反力により、下肢の動作状態をより容易に把握可能であると考えられる。

本学位論文ではfMRIによる脳機能解析を可能とする下肢動作提示システムLoMSについて述べた。LoMSは片脚3自由度有しており矢状面の動作提示が可能である。関節駆動にはMckibben型空気圧式人工筋肉を用い、各関節に独立したトルク提示が可能である。また、動作に伴う足底反力提示を矢状面上で行うことが可能である。MRI環境下で使用するために、LoMSはMRI適合性を有する必要があるMRI適合素材から構成されている。MRI適合性試験によりLoMSがMRI適合性を有することを確認した。MRI適合性試験ではfMRIのヘッドコイルからLoMSまでの距離が実用の範囲（400[mm]以上）であればLoMSの存在及び動作がfMRIの撮像画質を低下させないことを確認した。また、fMRI撮像環境下でLoMSが正常に関節角度計測可能であることを確認した。LoMSによる歩行模擬動作提示性能評価では装着者の筋活動の観点から生体電位変遷と歩行時の筋抑制の2点で評価を行った。まず、トレッドミル歩行とLoMSによる歩行模擬動作での動作1サイクル中の生体電位変遷を比較し、腸腰筋、大腿四頭筋、前脛骨筋およびヒラメ筋で相関があることを確認した。次に、トレッドミル歩行と歩行模擬動作時のヒラメ筋の抑制を計測し、両動作で同レベルの抑制が生じることを確認した。歩行模擬動作提示性能評価により、歩行模擬動作を提示することにより歩行時の小脳-脳幹-脊髄レベルの自動的制御を誘発可能であることを示した。また、LoMSを用いて歩行模擬動作と半側負荷歩行模擬動作を動作タスクとした脳活動計測実験を行った。歩行模擬動作により、歩行に関連する脳領域が賦活することを確認した。また、半側負荷歩行模擬動作では動作提示を行う支援側と動作提示を行わない負荷側に分け、左右の半球で異なる領域が動作調整のために賦活することを確認した。また、ステップ動作時の足底反力提示の有無による脳活動変化計測実験により足底反力を提示することで動作の知覚が容易になり、動作制御及び体性感覚に関連する脳賦活領域が小さくなることを確認した。以上の脳活動計測実験を通して、fMRIによる歩行模擬動作時の脳機能解析のためにLoMSが有用であることを示した。